

平成22年5月17日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19360243  
 研究課題名（和文） 高性能コンクリートの実環境における性状変化と耐凍害性  
 研究課題名（英文） Property change and frost resistance of high performance concrete under actual environment  
 研究代表者  
 千歩 修（SENBU OSAMU）  
 北海道大学大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：10236127

## 研究成果の概要（和文）：

乾湿繰返し、暴露が高強度コンクリートの耐凍害性におよぼす影響について検討した。主な結果は、1) 既往のデータによる凍結融解試験結果予測手法の提案、2) 含水率分布による凍害劣化形態の分類、3) 含水率分布が生じたコンクリートの凍結融解による含水率上昇の確認、4) 屋外暴露による含水状態等の実測、5) 実環境における乾湿繰返しの影響を考慮した耐凍害性評価方法の提案、である。

## 研究成果の概要（英文）：

Effects of alternating immersion and exposure on the frost resistance of high strength concrete were investigated. Results are as follows. 1) A prediction method for results of freezing and thawing is proposed based on previous data. 2) Types of the frost deterioration of concrete are classified by the water distribution in specimens caused by drying. 3) Freezing and thawing process rises water content of dried concrete. 4) Microclimates in concrete exposed outdoor are measured. 5) An evaluation method for frost resistance of concrete considering alternating immersion of actual condition.

## 交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2007年度 | 13,100,000 | 3,930,000 | 17,030,000 |
| 2008年度 | 1,800,000  | 540,000   | 2,340,000  |
| 2009年度 | 1,300,000  | 390,000   | 1,690,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 16,200,000 | 4,860,000 | 21,060,000 |

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：構造材料、コンクリート、耐凍害性、実環境、暴露、乾湿繰返し

## 1. 研究開始当初の背景

高強度・高流動コンクリートなどの高性能コンクリートは、AE剤などで空気を連行しないもの(nonAE)でも高い耐凍害性を示すと

いう試験結果が数多く報告されている。しかしながら、これらの結果は一般的な促進凍結融解試験によるものであり、研究代表者らは、このような試験で耐凍害性が高いと評価さ

れた nonAE の高強度コンクリートでも屋外暴露等の後に同じ促進試験を行うと、耐凍害性が大きく低下するものがあることを明らかにしている。この耐凍害性低下の理由として、暴露中の乾湿繰返し等の作用がコンクリートに微細なひびわれを発生させていること、材料の性状が変化していることなどが考えられる。

高性能コンクリートの耐久性・耐凍害性は明確になっていないといえ、実環境における劣化に対応した新しい試験方法、劣化のメカニズム等を検討する必要がある。なお、これらの検討は、一般的なコンクリートについても重要なものである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的を次に示す。なお、3 および 4 の項目では [ ] 内の記述を使用する。

(1) 既往の凍結融解試験データに基づき、コンクリートの耐凍害性におよぼす乾湿繰返しおよび暴露の影響を把握する。さらに、乾湿繰返し等を考慮した凍結融解試験結果の予測方法についても検討を行う。[既往の試験データの検討]

(2) 乾湿繰返し等がコンクリートの各種性状および耐凍害性におよぼす影響を実験的に検討する。なお、ここでは、粗骨材の影響、試験体の含水状態を中心に検討する。[乾湿繰返しの影響についての実験的検討]

(3) 乾湿繰返し等を考慮したコンクリートの凍害劣化メカニズムについて検討する。なお、凍結融解時に試験体の含水率が上昇することが考えられ、ここではこの点を中心に検討する。[凍害メカニズムの検討]

(4) 屋外暴露試験を行い、コンクリートの劣化外力と性状変化を把握する。なお、ここでの測定項目は、試験体内部の温度、湿度(含水状態)、吸水性状等である。[実環境における劣化外力の把握]

(5) 実環境における材料の性状変化を考慮したコンクリートの耐凍害性評価方法を提案する。なお、ここでは、凍結融解試験開始条件として、暴露後と同様の劣化となる乾湿繰返し条件を検討する。[耐凍害性評価方法の提案]

## 3. 研究の方法

### (1) 既往の試験データの検討

検討に用いたデータは、当研究室の過去 19 年間の凍結融解試験データであり、乾湿繰返し・暴露の有無、粗骨材種別、水セメント比、空気量、気泡間隔係数、相対動弾性係数および質量変化率の変化、耐久性指数等について整理し、分析を行った。なお、暴露とは 1 年以上屋外暴露を行ったもの、乾湿繰返しとは乾燥温度が 20~40℃ の条件のものとし、これらの後に凍結融解試験(JIS A 1148 A 法)を

行ったものである。

(2) 乾湿繰返しの影響についての実験的検討  
ここでは、乾湿繰返しがコンクリートにおよぼす影響を次の観点から検討した。

#### ①粗骨材の体積・粒度分布の影響

乾湿繰返し時にモルタルと粗骨材の挙動の違い等から微細ひび割れを発生させていることが考えられる。このため、粗骨材の体積・粒度分布を変えたコンクリート(W/C25%、目標空気量 1%)を作製し、水中養生(2 週間)後・乾燥(20℃60%R.H.で 28 日間放置)後・乾湿繰返し(40℃乾燥 42 時間・20℃水中 6 時間を 7 サイクル：以下、d7 と称す)後に凍結融解試験(JIS A 1148 A 法)等を行った。

#### ②粗骨材種別・水セメント比の影響

粗骨材種別がコンクリートの耐凍害性におよぼす影響は、モルタル部分の性状によって異なることが考えられる。このため、3 種類の粗骨材を使用し、水セメント比を 25% および 50% としたコンクリートを作製し、乾湿繰返し(d7)の有無の条件を加え、凍結融解試験(JIS A 1148 A 法)を行った。なお、粗骨材の各種性状・熱膨張係数、粗骨材およびコンクリートの吸水性状等についても測定を行い、これらの性状からコンクリートの耐凍害性について検討を行った。

#### ③乾湿繰返しによる耐凍害性低下に対する影響要因の検討

乾湿繰返しによって耐凍害性が大きく低下する高強度コンクリートでも、乾湿繰返し後の吸水時間等の条件を変えることによって耐凍害性が大きく変化することがある。このため、水中養生期間、乾湿繰返しの条件として、繰返しサイクル数、乾燥・湿潤期間、乾湿繰返し後の水中浸漬の有無、試験体寸法を変え、これらの要因がコンクリートの耐凍害性におよぼす検討を行った。なお、凍結融解試験は、JIS A 1148 A 法によるものであり、一部の試験体に含水率センサーを埋め込み、電気抵抗法により含水率分布を測定した。

#### (3) 凍害メカニズムの検討

##### ①乾湿繰返し・凍結融解を受ける含水状態および長さ変化

乾湿繰返しおよび凍結融解は、試験体の含水状態を変化させるが、その詳細は明らかになっていない。このため、試験体(W/C : 25% および 45%)に含水率センサーを埋め込み、乾湿繰返し・凍結融解時の含水率分布・水分移動および長さ変化等を測定した。なお、乾湿繰返し条件は d7 であり、凍結融解試験は JIS A 1148 A 法によるものである。

##### ②乾燥を受けた凍害劣化挙動の把握

乾燥した試験体の凍結融解による劣化挙動は、水分移動を伴うものであり、通常の凍結融解試験による劣化挙動と異なるといえる。ここでは、水セメント比 25%・空気量 1% のコンクリートを作製し、水中養生後・乾湿

繰返し(d7)後に、各種の凍結融解条件を作用させ、この時の含水率変化(電気抵抗法)、湿度変化(湿度センサー埋込み)、長さ変化、潜熱積算温度(凍結水量に対応。測定した温度から算定)等を測定した。

#### (4) 実環境における劣化外力の把握

本実験は、75mm 角の断面の試験体の表層から 15mm の位置にボタン型センサーを設置し、屋外暴露時の温湿度を 30 分毎に継続的に測定したものである。使用したコンクリートは、25%、45%および 55%の 3 種類とし、暴露方法は、北大実験棟屋上の水切りのよい台上であり、暴露期間は 2007.8.4 から 1 年間である。

#### (5) 耐凍害性評価方法の提案

屋外暴露を行った後に凍結融解試験を行うとどのようなコンクリートでもその耐凍害性は変化する。実環境におけるコンクリートの耐凍害性を評価するためには、この影響を考慮した試験方法が必要である。このため、凍結融解試験開始条件として、水中養生後に各種の乾湿繰返し条件を加えた凍結融解試験を行い、この凍結融解試験結果と屋外暴露後の凍結融解試験結果を比較する。この検討から、実環境に暴露したものと同様の劣化を示す凍結融解試験開始条件(促進乾湿繰返し条件)を「屋外暴露による乾湿繰返しの影響を考慮した耐凍害性評価方法」として提案する。なお、凍結融解試験は JIS A 1148 A 法であり、使用したコンクリートの水セメント比は、25%、35%および 45%の一般的な材料を用いたものである。また、乾燥温度は、過度な乾燥とならないものとし、20℃および 40℃とした。

さらに、上記の実験で提案した凍結融解試験方法を用いて各種のコンクリートの耐凍害性を検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 既往の試験データの検討

##### ①研究の主な成果

暴露後・乾湿繰返し後に凍結融解試験を行うと、養生直後に試験を行ったものとは異なる耐凍害性を示し、水セメント比 40%以下では耐凍害性が低下するが、水セメント比 40%を超えると耐凍害性が向上する傾向がある。

コンクリートの水セメント比が 35%程度以下となると、養生直後・乾湿繰返し後・暴露後のどの条件においても凍結融解試験における質量変化率がきわめて小さくなる。

各種の水セメント比のコンクリートについて、試験開始条件を 2 週水中養生後・暴露後・乾湿繰返し後としたコンクリートの凍結融解試験における標準的な相対動弾性係数低下式(凍結融解試験結果の予測方法の一つ)を求めた。

##### ②得られた成果の位置づけ、今後の展望等

これまで、一般のコンクリートは乾燥を受けると耐凍害性が向上すること、高強度コンクリートは乾燥を受けると耐凍害性が低下することが数多く報告されていたが、水セメント比でこの乾燥の影響が変化する境界と考えられるものを示したことは、これらの結果を総合的に説明できるものである。この理由を明らかにすることは、実環境におけるコンクリート構造物の耐久性を考えるうえで重要と考えられる。

また、コンクリートの材料・調合、暴露条件等の影響を考慮してコンクリートの性状変化を予測できれば、実環境におけるコンクリート構造物の寿命予測等に発展させることができる。このための最初の段階として、暴露等の影響を考慮した相対動弾性係数低下式の意義は大きい。

#### (2) 乾湿繰返しの影響についての実験的検討

##### ①研究の主な成果

乾湿繰返しによるコンクリートの耐凍害性の変化には、粗骨材の容積・粒度分布、コンクリートの乾燥収縮率が影響する。

乾湿繰返しによるコンクリートの耐凍害性の変化におよぼす粗骨材種別の影響は、水セメント比 50%では大きい、水セメント比 25%では小さくなる。

高強度コンクリートは、乾湿繰返しによる含水率の低下が内部まで進むと耐凍害性が著しく低下する。

##### ②得られた成果の位置づけ、今後の展望等

今回の結果から、乾湿繰返しによる高強度コンクリートの耐凍害性の変化には、粗骨材種別は影響するものの、その程度は小さく、モルタル・セメントペースト部分の影響が大きいものと考えられる。このメカニズムについては、次項で検討する。また、粗骨材種別がコンクリートにおよぼす影響は、水セメント比によって異なることが明らかとなった。このことは、粗骨材種別がコンクリートの耐凍害性におよぼす影響を検討するうえで重要なものと考えられる。

#### (3) 凍害メカニズムの検討

##### ①研究の主な成果

高強度コンクリートの試験体が乾燥によって含水率勾配の生じた状態(表層：乾燥、内部：湿潤)で水中凍結融解を受けると、表層の凍結水量が増加し、内部から表層へ水分が移動することが推察された。

##### ②得られた成果の位置づけ、今後の展望等

コンクリートが凍結融解作用で劣化するためには、含水率が高まる必要があるが、高強度コンクリートの凍結融解試験時の含水率上昇メカニズムを明らかにするための貴重なデータが得られたものといえる。このメカニズムを検討することは、一般的なコンクリートを含め、実環境におけるコンクリートの凍害劣化を新しい観点から考えることに結

び付くものと考えられる。

#### (4) 実環境における劣化外力の把握

##### ①研究の主な成果

台上に暴露したコンクリート試験体の表層から 15mm の位置の相対湿度は、水セメント比が大きいものほど大きくなる。

水セメント比が 25% のコンクリートは、暴露時の内部の湿度が最大値でも 95% 程度以下となり、この条件では凍害劣化を受けにくいと考えられる。

##### ②得られた成果の位置づけ、今後の展望等

この成果は、促進凍結融解試験結果と暴露試験結果が対応しない理由を説明するものである。凍害を受けるためにはコンクリートの含水状態が高まる必要があり、実環境におけるコンクリートの耐凍害性を評価するためには部位条件の影響の考慮が重要であることを示すものといえる。今後、建築物等の部位条件の明確化のための研究が必要と思われる。

#### (5) 耐凍害性評価方法の提案

##### ①研究の主な成果

屋外暴露による乾湿繰返しの影響を考慮した耐凍害性評価方法として、「水中養生後に乾湿繰返し(40℃乾燥 42 時間・20℃水中 6 時間を 7 サイクル)行い、JIS A 1148 A 法による凍結融解試験を行う方法」を提案した。

提案方法で評価した各種コンクリートの耐凍害性は、これまでの方法で評価したものと異なる結果を示し、コンクリート種別によって大きく異なる傾向を示した。

##### ②得られた成果の位置づけ、今後の展望等

本研究の各種実験等から実環境においてコンクリートは乾湿繰返しの影響を受け、その性状が変化することが明らかとなった。この影響を考慮したコンクリートの耐凍害性評価方法は、実環境におけるコンクリートの耐凍害性を評価するうえで必須なものであり、この方法を提案したことの意義は大きい。なお、この成果は他の研究者にも影響を与え、コンクリートの凍害分野の研究では乾湿繰返しの影響を考慮した研究が増加している。

しかしながら、提案した方法は不十分な点もあり、さらなる検討が必要である。また、実環境における耐凍害性を評価するには、乾湿繰返し以外の条件についても検討が必要と考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(下線は、研究代表者・連携研究者)

[雑誌論文] (計 6 件)

① 長谷川拓哉、千歩 修：札幌市に屋外暴露したコンクリート内部の温湿度変化、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.31, No.1, 907-912, 2009

② 二宮祐希、千歩 修、長谷川拓哉：粗骨材の基礎性状がコンクリートの耐凍害性に

及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.31, No.1, 1189-1194, 2009

③ 長谷川拓哉、千歩 修：凍結融解作用によるコンクリートの質量変化に関する文献的検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.30, No.1, 933-937, 2008

④ 中野佑樹、千歩 修、長谷川拓哉、酒井正樹：含水状態・水分移動が高強度コンクリートの凍害劣化におよぼす影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.30, No.1, 939-944, 2008

⑤ 酒井正樹、千歩 修、長谷川拓哉、中野佑樹：乾燥を考慮したコンクリートの凍害劣化挙動、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.30, No.1, 945-950, 2008

⑥ 米田恭子、千歩 修、長谷川拓哉：既往の凍結融解試験データに基づくコンクリートの耐凍害性に及ぼす乾湿繰返し・暴露の影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.30, No.1, 951-956, 2008

[学会発表] (計 14 件)

① 千歩 修、長谷川拓哉：各種コンクリートの乾湿繰返し・暴露による耐凍害性の変化、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, 625-626, 2009

② 中野佑樹、千歩 修、長谷川拓哉：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす材料・試験条件の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, 627-628, 2009

③ 酒井正樹、千歩 修、長谷川拓哉、中野佑樹：乾燥を受けた高強度コンクリートの凍結融解時における水分移動、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, 973-974, 2008

④ 米田恭子、酒井正樹、千歩 修、長谷川拓哉：乾湿繰返しが各種コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, 1105-1106, 2007

⑤ 朴龍圭、酒井正樹、千歩 修、長谷川拓哉：大断面高強度コンクリート部材の乾湿繰返し・凍結融解時の長さ変化および比抵抗の実測、建築学会北海道支部研究報告論文集、No. 80, 389-392, 2007

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

千歩 修 (SENBU OSAMU)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10236127

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

長谷川拓哉 (HASEGAWA TAKUYA)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30360465